

# 无线电能传输系统用屏蔽层结构的研究

李厚基<sup>1</sup>, 王春芳<sup>1</sup>, 魏芝浩<sup>1</sup>, 李 聃<sup>2</sup>

(1. 青岛大学电气工程学院, 山东 青岛 266071;

2. 青岛鲁渝能源科技有限公司, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 无线电能传输系统中的松耦合变压器在工作过程中, 由于电磁干扰降低了系统接收电路和发射电路的可靠性, 并对周围的生命体安全造成一定的影响。为此基于 1kW 无线电能传输系统优化设计了四种松耦合变压器用屏蔽层结构和尺寸, 利用有限元仿真软件分别对比分析了发射线圈下方 10mm 处水平位置和线圈外 150mm 处竖直位置的屏蔽效果, 在保证发射电路可靠性及生命体安全的前提下, 从圆盘型、圆环型及扇型屏蔽层中, 优化出带边沿扇型的屏蔽层; 以圆环形屏蔽层为例, 分析了内、外沿延伸距离对屏蔽效果的影响, 并优化出向内、向外延伸的最佳距离, 优化设计了扇型屏蔽层的填充比。最后搭建了系统实验平台, 对部分屏蔽层进行了实验验证。

**关键词:** 屏蔽层; 松耦合变压器; 无线电能传输; 磁通密度

**DOI:** 10.12067/ATEEE1807013

**文章编号:** 1003-3076(2019)05-0074-10

**中图分类号:** TM937

## 1 引言

近几年无线电能传输(Wireless Power Transmission, WPT)技术得到迅速发展, 该技术已经广泛应用到电动汽车无线充电<sup>[1,2]</sup>、植入式医疗设备<sup>[3]</sup>、地下矿井<sup>[4]</sup>等领域, 其具有安全、方便、时尚等特点。随着 WPT 技术的发展, 用户越来越关心 WPT 系统的电磁干扰问题, 而电磁干扰主要来自系统中的松耦合变压器, 其性能好坏直接影响 WPT 系统的效率、传输距离及传输能力<sup>[5]</sup>。松耦合变压器的设计包括耦合线圈的设计和屏蔽层的设计, 由于发射端和接收端线圈之间距离较大, 使得系统耦合系数较低, 漏磁严重, 传输效率低。当传输距离一定时, 合适的屏蔽层不仅可以提高系统的耦合系数, 进而提高传输效率, 还可以减小系统对周围环境的电磁污染, 因此屏蔽层的设计对无线电能传输系统十分重要<sup>[6]</sup>。文献[7,8]主要对加铁氧体板进行屏蔽的效果展开研究, 但并未对屏蔽层的结构和尺寸进行优化。文献[9-12]分别对无线充电过程中异物的影响、耦合线圈的大小、线圈间的距离进行了研究, 但未涉及周围环境的电磁污染问题。文献[13-16]对

带缺口屏蔽层的线圈在垂直、水平方向的屏蔽效果进行分析, 但并未对不同形状的屏蔽层进行研究。然而, 实际的无线充电系统其发射电路一般位于发射线圈下方 10mm 处, 系统的可靠性在很大程度上取决于发射电路的可靠性; 另外, 根据电磁环境控制限制的规定, 需保证生命体免受磁场的影响。为此, 本文以 1kW 无线电能传输系统为研究对象, 设计了 4 种屏蔽层结构和尺寸, 利用有限元仿真软件对比分析了 4 种屏蔽层的屏蔽效果, 研究和分析了发射线圈下方 10mm 处、线圈外 150mm 处的磁通密度以及对周围环境的电磁污染程度, 在保证系统可靠性和人身安全的情况下, 优化了 4 种屏蔽层的结构和尺寸。

## 2 屏蔽层设计

本文发射端和接收端线圈采用环形集中结构, 其中发射端线圈外径为 200mm, 内径为 125mm, 厚度为 12mm; 接收端线圈外径为 180mm, 内径为 140mm, 厚度为 13mm; 线圈之间的距离为 35mm, 导线采用线径 2.5mm 的利兹线, 且发射端和接收端线圈采用相同的屏蔽层, 屏蔽层材料选用 JSOL 公司

**收稿日期:** 2018-07-04

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51877113)

**作者简介:** 李厚基(1996-), 男, 山东籍, 硕士研究生, 研究方向为电力电子变流技术;

王春芳(1964-), 男, 山西籍, 教授, 研究方向为电能变换技术与新能源开发技术。

的 Mn-Zn ferrite\_2500。利用有限元仿真软件对屏蔽层进行了优化设计,设计了 4 种屏蔽层结构,如图 1 所示。屏蔽层的厚度均为 2mm,发射和接收线圈屏蔽层外径均为 214mm。

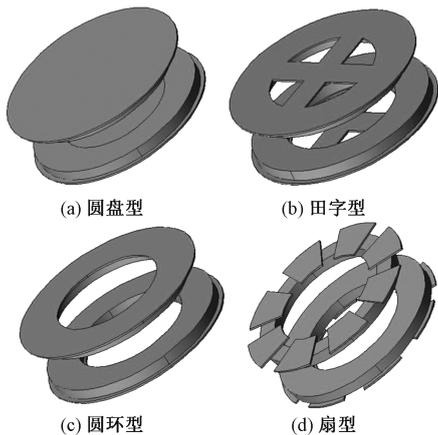


图 1 屏蔽层结构示意图

Fig. 1 Shield structure diagram

将 Saber 仿真得到的参数,在 JMAG 有限元仿真软件中设置在线圈的两端,对上述 4 种屏蔽层进行了仿真,并分析了仿真结果,屏蔽层结构磁通密度分布云图如图 2 所示。线圈电磁污染的影响主要包括两部分:①对电路板的电磁干扰,使电路不能正常工作;②对用户的辐射。根据以上两种影响分别测量了发射线圈下方 10mm 处水平位置磁通密度和线圈外 150mm 处竖直位置磁通密度,其具体测量位置如图 3 所示。发射线圈下方 10mm 处磁通密度反映了线圈对于电路板的电磁干扰程度,需要尽量小;线圈外 150mm 处的磁通密度必须小于 GB8702-2014 电磁环境控制限制的规定,以免生命体受电磁辐射的影响。

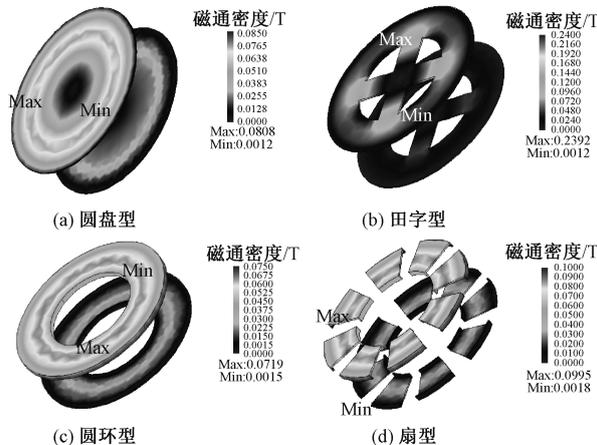


图 2 屏蔽层结构磁通密度分布云图

Fig. 2 Magnetic flux density distribution of shield structure

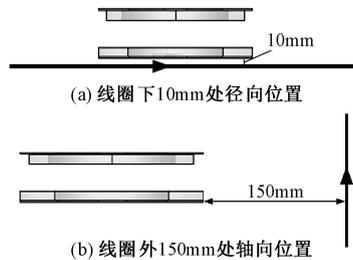
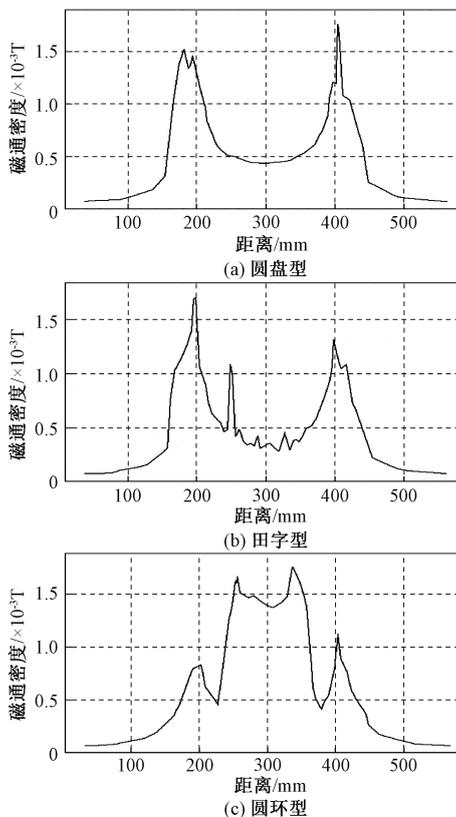


图 3 测量位置示意图

Fig. 3 Measurement position diagram

当线圈不加屏蔽层时,可测得发射线圈下方 10mm 处水平最大磁通密度为  $3.50 \times 10^{-3} \text{T}$ 、线圈外 150mm 处竖直最大磁通密度为  $1.28 \times 10^{-4} \text{T}$ 。

图 4 分别为圆盘型、田字型、圆环型及扇型在发射线圈下方 10mm 处的水平磁通密度。可以看出,圆盘型的最大磁通密度为  $1.76 \times 10^{-3} \text{T}$ ,田字型的最大磁通密度为  $1.71 \times 10^{-3} \text{T}$ ,圆环型的最大磁通密度为  $1.78 \times 10^{-3} \text{T}$ ,扇型的最大磁通密度为  $1.76 \times 10^{-3} \text{T}$ 。田字型屏蔽层与圆盘型屏蔽层相比,田字型屏蔽层的体积要小于圆盘型的体积,但是田字型屏蔽层在发射线圈下方 10mm 处水平位置的屏蔽效果要优于圆盘型;圆环型和扇型屏蔽层的体积要远小于前两种屏蔽层的体积,但是它们在发射线圈下方 10mm 处水平位置的屏蔽效果与前两种屏蔽层的屏蔽效果相近。



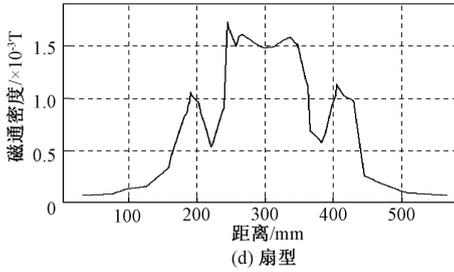


图4 发射线圈下方10mm处水平磁通密度  
Fig. 4 Horizontal flux density at 10mm under coil

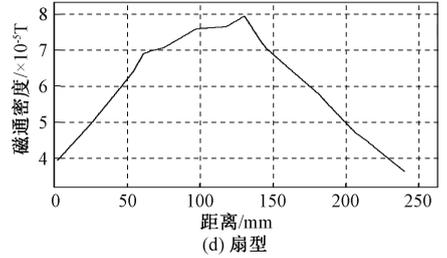


图5 线圈外150mm处竖直磁通密度  
Fig. 5 Vertical flux density at 150mm outside coil

图5分别为圆盘型、田字型、圆环型及扇型在线圈外150mm处的竖直磁通密度。可以看出,圆盘型的最大磁通密度为 $8.13 \times 10^{-5} \text{T}$ ,田字型的最大磁通密度为 $8.24 \times 10^{-5} \text{T}$ ,圆环型的最大磁通密度为 $8.38 \times 10^{-5} \text{T}$ ,扇型的最大磁通密度为 $8.45 \times 10^{-5} \text{T}$ 。带边沿圆环型和带边沿扇型屏蔽层的体积要小于前两种屏蔽层的体积,但是它们在线圈外150mm处竖直位置的屏蔽效果基本和前两种屏蔽层的屏蔽效果相同。综合考虑上述4种屏蔽层在发射线圈下方10mm处水平位置和在线圈外150mm处竖直位置的屏蔽效果,可以发现圆环型和扇型屏蔽层的体积要小于前两种屏蔽层的体积,但是它们的屏蔽效果与前两种屏蔽层的屏蔽效果相近,但是假如带上边沿,可能会对屏蔽效果有影响,因此接下来有必要研究边沿对屏蔽效果的影响。

### 3 边沿对屏蔽效果的影响

首先研究圆盘型屏蔽层是否加边沿对屏蔽效果的影响,分别建立了不加边沿、只加内沿、只加外沿及内沿加外沿的4种圆盘型屏蔽层模型,如图6所示,在内外沿之间为线圈。利用JMAG仿真软件对上述4种模型进行仿真,并分析仿真结果。

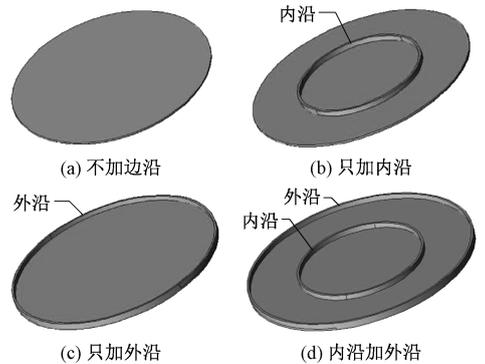
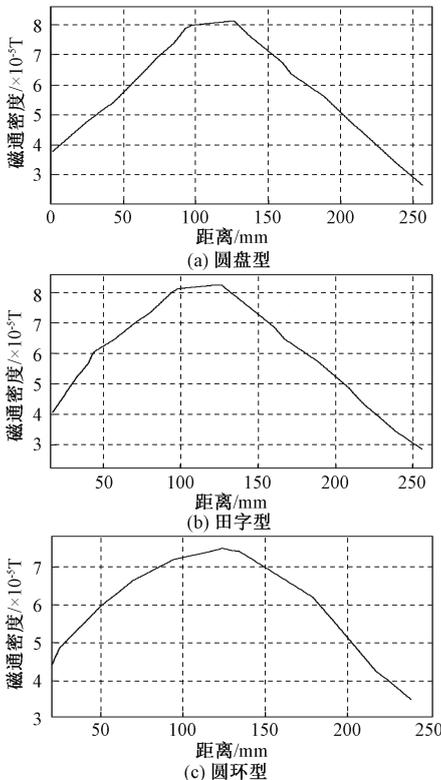


图6 加与不加边沿的圆盘型屏蔽层  
Fig. 6 Disc-type shield with or without edge



圆盘型屏蔽层的仿真结果如表1所示。可以看出,与不加边沿圆盘型屏蔽层相比,只加内沿时对发射线圈下方10mm处水平位置的屏蔽效果提升了25.6%,对线圈外150mm处竖直位置的屏蔽效果提升了4%;只加外沿时对发射线圈下方10mm处水平位置的屏蔽效果提升了48%,对线圈外150mm处竖直位置的屏蔽效果提升了13.5%;既加内沿也加外沿时对发射线圈下方10mm处水平位置的屏蔽效果提升了49%,对线圈外150mm处竖直位置的屏蔽效果提升了13.8%。对于圆盘型屏蔽层来说,在添加了外沿之后,再添加内沿,屏蔽效果基本没有提升,因此圆盘型屏蔽层没有添加内沿的必要,只需要添加外沿即可。

然后研究圆环型屏蔽层是否加边沿对屏蔽效果的影响,分别建立了不加边沿、只加内沿、只加外沿

表1 圆盘型屏蔽层的仿真结果

Tab. 1 Simulation results of disc shield

类型	发射线圈下方 10mm 水平最大磁通密度/T	线圈外 150mm 竖直最大磁通密度/T
不加边沿	$1.76 \times 10^{-3}$	$8.13 \times 10^{-5}$
只加内沿	$1.31 \times 10^{-3}$	$7.82 \times 10^{-5}$
只加外沿	$0.91 \times 10^{-3}$	$7.03 \times 10^{-5}$
内沿加外沿	$0.90 \times 10^{-3}$	$7.00 \times 10^{-5}$

及内沿加外沿的 4 种圆环型屏蔽层模型,利用 JMAG 仿真软件对上述四种模型进行仿真,并分析仿真结果。

圆环型屏蔽层的仿真结果如表 2 所示,可以看出,与不加边沿圆环型屏蔽层相比,只加内沿时对发射线圈下方 10mm 处水平位置的屏蔽效果提升了 23.9%,对线圈外 150mm 处竖直位置的屏蔽效果提升了 4.1%;只加外沿时对发射线圈下方 10mm 处水平位置无屏蔽效果,对线圈外 150mm 处竖直位置的屏蔽效果提升了 10.7%;既加内沿也加外沿时对发射线圈下方 10mm 处水平位置的屏蔽效果提升了 28%,对线圈外 150mm 处竖直位置的屏蔽效果提升了 15%。对于圆环型屏蔽层来说,内沿对发射线圈下方 10mm 处水平位置的屏蔽效果要优于外沿,外沿对线圈外 150mm 处竖直位置的屏蔽效果要优于内沿。同时还可以发现,内沿加外沿圆环型屏蔽层在水平位置和竖直位置的屏蔽效果同时达到最优。

表2 圆环型屏蔽层的仿真结果

Tab. 2 Simulation results of ring-shaped shield

类型	发射线圈下方 10mm 水平最大磁通密度/T	线圈外 150mm 竖直最大磁通密度/T
不加边沿	$2.43 \times 10^{-3}$	$8.81 \times 10^{-5}$
只加内沿	$1.85 \times 10^{-3}$	$8.45 \times 10^{-5}$
只加外沿	$2.54 \times 10^{-3}$	$7.87 \times 10^{-5}$
内沿加外沿	$1.75 \times 10^{-3}$	$7.49 \times 10^{-5}$

最后研究扇型屏蔽层是否加边沿对屏蔽效果的影响,分别建立了不加边沿、只加内沿、只加外沿及内沿加外沿的 4 种扇型屏蔽层模型,利用 JMAG 仿真软件对上述四种模型进行仿真,并分析仿真结果。

扇型屏蔽层的仿真结果如表 3 所示。可以看出,与不加边沿扇型屏蔽层相比,只加内沿时对发射线圈下方 10mm 处水平位置的屏蔽效果提升了 39%,对线圈外 150mm 处竖直位置的屏蔽效果提升了 4.3%;只加外沿时对发射线圈下方 10mm 处水平位置的屏蔽效果提升了 24.6%,对线圈外 150mm 处竖直位置的

屏蔽效果提升了 10%;既加内沿也加外沿时对发射线圈下方 10mm 处水平位置的屏蔽效果提升了 50.3%,对线圈外 150mm 处竖直位置的屏蔽效果提升了 13.7%。对于扇型屏蔽层来说,内沿对发射线圈下方 10mm 处水平位置的屏蔽效果要优于外沿,外沿对线圈外 150mm 处竖直位置的屏蔽效果要优于内沿。同时还可以发现,内沿加外沿扇型屏蔽层在水平位置和竖直位置的屏蔽效果同时达到最优。

表3 扇型屏蔽层的仿真结果

Tab. 3 Simulation results of fan type shield

类型	发射线圈下方 10mm 水平最大磁通密度/T	线圈外 150mm 竖直最大磁通密度/T
不加边沿	$3.50 \times 10^{-3}$	$9.22 \times 10^{-5}$
只加内沿	$2.13 \times 10^{-3}$	$8.80 \times 10^{-5}$
只加外沿	$2.64 \times 10^{-3}$	$8.26 \times 10^{-5}$
内沿加外沿	$1.74 \times 10^{-3}$	$7.94 \times 10^{-5}$

对三种屏蔽层结构进行对比,结果如图 7 所示。可以看出,内沿加外沿扇型屏蔽层的体积要小于内沿加外沿圆环型屏蔽层的体积,但是内沿加外沿扇型屏蔽层在水平位置和竖直位置的屏蔽效果与内沿加外沿圆环型屏蔽层的屏蔽效果相近,因此,在选择屏蔽层结构时可以优先选择内沿加外沿扇型屏蔽层。

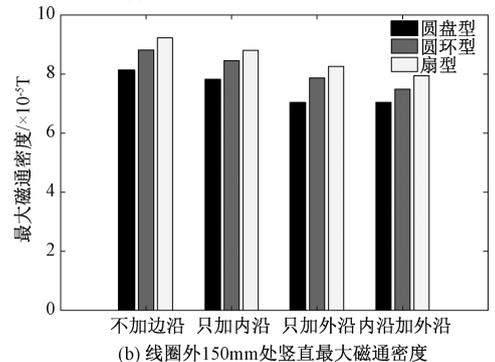
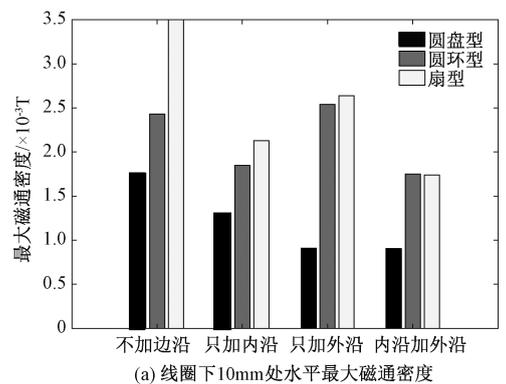


图7 不同形状屏蔽层磁通密度比较

Fig. 7 Comparison of magnetic flux density of different shape shields

### 4 屏蔽层尺寸的设计

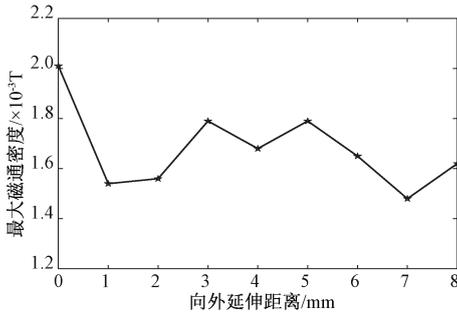
第3节研究了屏蔽层结构对屏蔽效果的影响,下面研究屏蔽层尺寸对屏蔽效果的影响,包括屏蔽层向外延伸距离、向内延伸距离、边沿延伸距离与扇型屏蔽层填充比对屏蔽效果的影响。各个延伸距离示意图如图8所示。



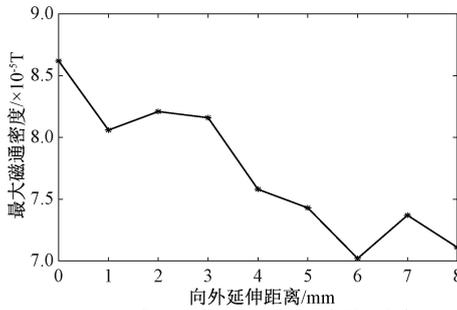
图8 延伸距离示意图  
Fig. 8 Extended distance diagram

#### 4.1 向外延伸对屏蔽效果的影响

以圆环型屏蔽层为例,研究向外延伸多少距离屏蔽效果最优。圆环型屏蔽层的边沿延伸距离为5mm(内沿和外沿同时延伸5mm),向内延伸2mm保持不变,向外延伸距离逐渐增大。向外延伸距离与最大磁通关系如图9所示。



(a) 线圈下10mm处水平最大磁通密度



(b) 线圈外150mm处竖直最大磁通密度

图9 向外延伸变化曲线

Fig. 9 Curve of outward extension

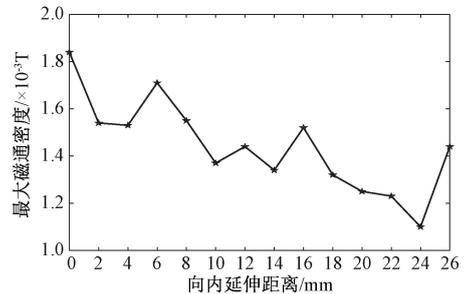
由于受到装置体积的限制,圆环型屏蔽层向外延伸不宜太长,由图9可以看出,圆环型屏蔽层向外

延伸1mm时,径向位置和轴向位置的屏蔽效果都有较大提升,因此圆环型屏蔽层向外延伸1mm即可。

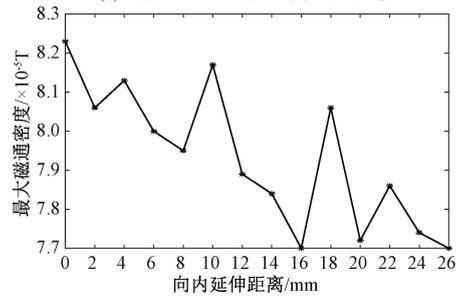
#### 4.2 向内延伸对屏蔽效果的影响

(1)情形1

利用 JMAG 仿真软件分析当线圈尺寸不同时,圆环型屏蔽层向内延伸多少距离屏蔽效果最优。当发射线圈外径为200mm、内径为125mm,接收线圈外径为180mm、内径为140mm时,圆环型屏蔽层的边沿延伸距离为5mm,向外延伸距离为1mm保持不变,向内延伸距离逐渐增大,向内延伸距离与最大磁通关系如图10所示。



(a) 线圈下10mm处水平最大磁通密度



(b) 线圈外150mm处竖直最大磁通密度

图10 向内延伸变化曲线(情形1)

Fig. 10 Curve of inward extension (example 1)

由图10可以看出,当发射线圈外径为200mm,圆环型屏蔽层向内延伸发射线圈外径的14%(向内延伸28mm)时,在发射线圈下方10mm处水平位置屏蔽效果最优,它的屏蔽效果相较于向内延伸0mm时的屏蔽效果提升了40.49%;还可以发现圆环型屏蔽层向内延伸对线圈外150mm处竖直位置的屏蔽效果基本无影响。

(2)情形2

当发射线圈外径为100mm、内径为62.5mm,接收线圈外径为90mm、内径为70mm时,圆环型屏蔽层的边沿延伸距离为5mm,向外延伸距离为1mm保持不变,向内延伸距离逐渐增大。向内延伸距离与最大磁通关系如图11所示。

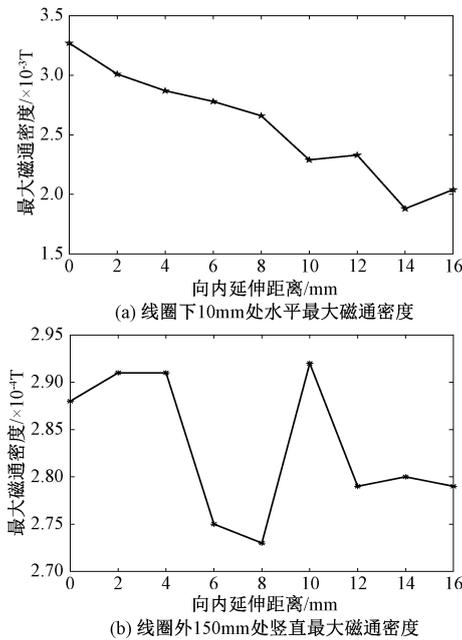


图 11 向内延伸变化曲线(情形 2)

Fig. 11 Curve of inward extension (example 2)

由图 11 可以看出,当发射线圈外径为 100mm,圆环型屏蔽层向内延伸发射线圈外径的 14%(向内延伸 14mm)时,在发射线圈下方 10mm 处水平位置屏蔽效果最优,它的屏蔽效果相较于向内延伸 0mm 时的屏蔽效果提升了 42.51%;由于当发射线圈外径为 100mm 时,线圈外 150mm 处竖直磁通密度为 0,经仿真发现线圈外 75mm 处竖直磁通密度可以测出,因此选择测量线圈外 75mm 处轴向最大磁通密度,圆环型屏蔽层向内延伸对线圈外 75mm 处竖直位置的屏蔽效果基本无影响。

### (3)情形 3

当发射线圈外径为 300mm、内径为 187.5mm,接收线圈外径为 270mm、内径为 210mm 时,圆环型屏蔽层的边沿延伸距离为 5mm,向外延伸距离为 1mm 保持不变,向内延伸距离逐渐增大。向内延伸距离与最大磁通关系如图 12 所示。由图 12 可以看出,当发射线圈外径为 300mm,圆环型屏蔽层向内延伸发射线圈外径的 12%(向内延伸 36mm)时,在发射线圈下方 10mm 处水平位置屏蔽效果最优,它的屏蔽效果相较于向内延伸 0mm 时的屏蔽效果提升了 40.71%;还可以发现圆环型屏蔽层向内延伸对线圈外 150mm 处竖直位置的屏蔽效果基本无影响。

由以上仿真可知,当线圈尺寸不同时,圆环型屏蔽层向内延伸发射线圈外径的 12%~14%时,在

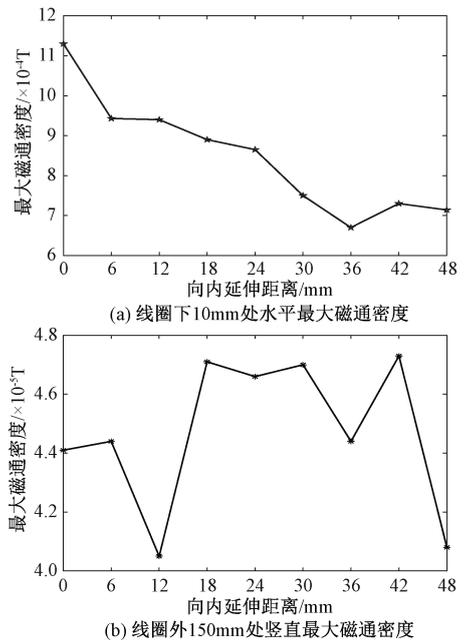


图 12 向内延伸变化曲线(情形 3)

Fig. 12 Curve of inward extension (example 3)

水平位置的屏蔽效果有极大的提升;但是圆环型屏蔽层向内延伸对竖直位置的屏蔽效果基本无影响。

### 4.3 边沿延伸对屏蔽效果的影响

圆环型屏蔽层向外延伸 1mm,向内延伸 28mm 保持不变,内沿和外沿延伸相同的距离,且距离逐渐增大(在没有特殊说明的情况下,发射线圈外径为 200mm,内径为 125mm,接收线圈外径为 180mm,内径为 140mm)。边沿延伸距离与最大磁通关系如图 13 所示。由图 13 可以看出,随着边沿延伸距离的增加,圆环型屏蔽层在发射线圈下方 10mm 处水平位置和线圈外 150mm 处竖直位置的屏蔽效果越来越好;但是边沿延伸距离不能过长,这是因为如果边沿延伸过长,它会极大地增加屏蔽层的体积、重量及成本。综合考虑上述问题,可使边沿延伸距离与线圈厚度相等。

## 5 填充比对屏蔽效果的影响

扇型屏蔽层的填充比如图 14 所示。将圆环型屏蔽层平均分成 8 份,每份为  $45^\circ$ (即为  $\beta$ )。每个小扇型屏蔽层的角度为  $\alpha$ ,  $\alpha/\beta$  为填充比,例如填充比为  $2/3$  时,每个小扇型屏蔽层的角度  $\alpha$  为  $30^\circ$ 。

扇型屏蔽层填充比为 0 时,即线圈不加屏蔽层;扇型屏蔽层填充比为 1 时,即屏蔽层为圆环型。填充比对屏蔽效果的影响如表 4 所示。

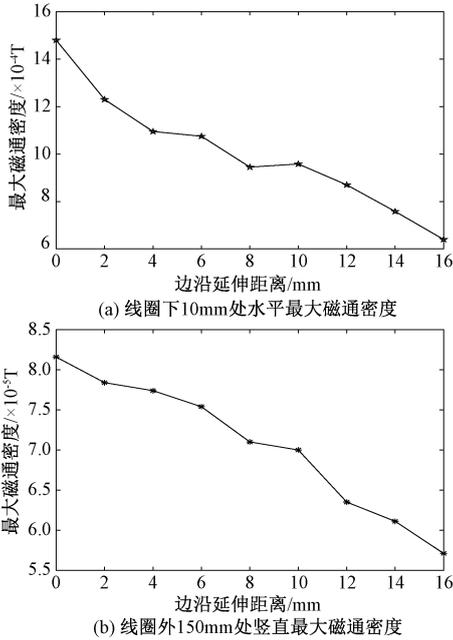


图 13 边沿延伸变化曲线

Fig. 13 Curve of extension at edge

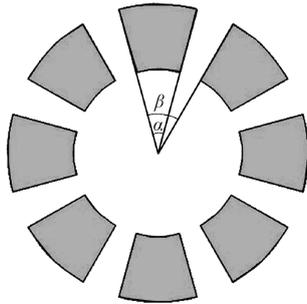


图 14 扇型屏蔽层填充比示意图

Fig. 14 Fill ratio of fan type shield

表 4 填充比的仿真结果

Tab. 4 Simulation results of fill ratio

填充比	发射线圈下方 10mm 水平最大磁通密度/T	线圈外 150mm 竖直最大磁通密度/T
0	$3.50 \times 10^{-3}$	$12.80 \times 10^{-5}$
1/9	$3.44 \times 10^{-3}$	$9.49 \times 10^{-5}$
2/9	$3.78 \times 10^{-3}$	$9.00 \times 10^{-5}$
3/9	$2.36 \times 10^{-3}$	$8.73 \times 10^{-5}$
4/9	$2.40 \times 10^{-3}$	$8.32 \times 10^{-5}$
1/2	$2.03 \times 10^{-3}$	$8.32 \times 10^{-5}$
5/9	$1.96 \times 10^{-3}$	$8.17 \times 10^{-5}$
6/9	$1.74 \times 10^{-3}$	$7.94 \times 10^{-5}$
7/9	$1.63 \times 10^{-3}$	$7.48 \times 10^{-5}$
8/9	$1.69 \times 10^{-3}$	$7.61 \times 10^{-5}$
1	$1.75 \times 10^{-3}$	$7.49 \times 10^{-5}$

由表 4 可以看出,当扇型屏蔽层填充比为 7/9

时,在发射线圈下方 10mm 处水平位置和线圈外 150mm 处竖直位置的屏蔽效果同时达到最优,同时可以发现此时的屏蔽效果要优于填充比为 1 时(此时屏蔽层为圆环型)的屏蔽效果;当填充比为 6/9 时,在发射线圈下方 10mm 处水平位置和线圈外 150mm 处竖直位置的屏蔽效果与填充比为 7/9 时的屏蔽效果相近,但屏蔽层的体积减少了 1/9,综合考虑之后可选择扇型屏蔽层的填充比为 6/9。

## 6 实验验证

搭建了传输功率为 1kW 的感应式单管无线电能传输系统实验平台<sup>[17,18]</sup>,如图 15 所示。实验中所用线圈和屏蔽层材料均与仿真参数一致,其发射线圈外径为 200mm,内径为 125mm,流过的电流有效值为 12.65A。为了与仿真结果对比,分别采用发射线圈加装圆盘型、圆环型及圆环型带边沿屏蔽层进行实验,其屏蔽层结构如图 16 所示。在测量线圈下方 10mm 处和线圈外 150mm 处磁通密度之前,均将电路调整为零电压开通(ZVS)状态,图 17 为开关管实现 ZVS 的软开关波形。

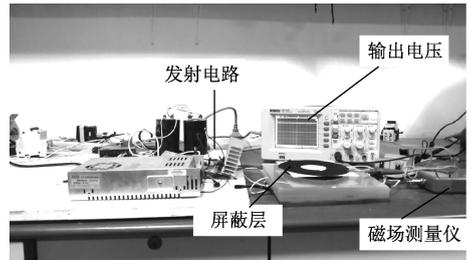


图 15 实验平台

Fig. 15 Experiment platform

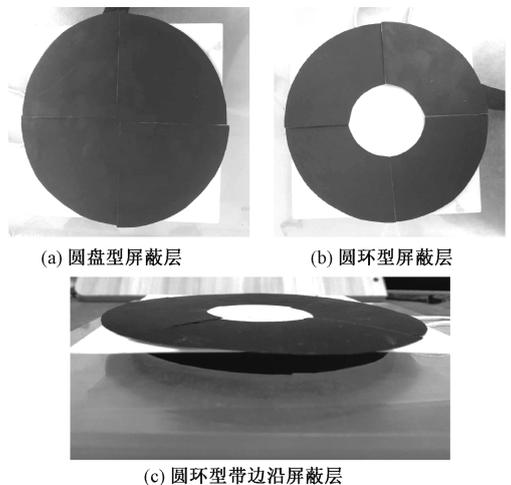


图 16 带屏蔽层的发射线圈

Fig. 16 Transmitting coil with shield

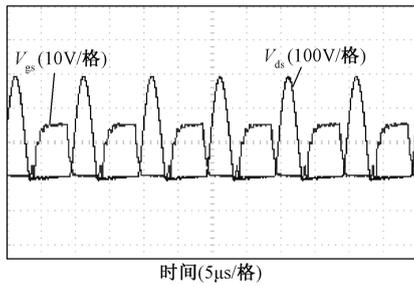


图 17 开关管的软开关波形

Fig. 17 Soft switching waveforms

图 18 为圆盘型和圆环型屏蔽层下方 10mm 处的磁通密度。图 19 为圆盘型和圆环型屏蔽层外 150mm 处磁通密度。由图 18 和图 19 可知,在发射线圈下方 10mm 处带圆盘型和圆环型屏蔽层最大磁通密度测量值基本相同,只是出现的位置不同。在线圈外 150mm 处,圆环型屏蔽层仅比圆盘型屏蔽层最大磁通密度高 3.5%,然而圆环型屏蔽层所用材料远小于圆盘型屏蔽层。

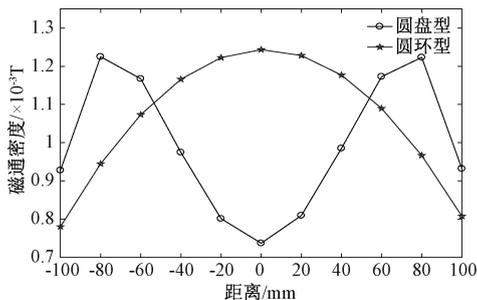


图 18 线圈下方 10mm 处磁通密度比较

Fig. 18 Comparison of magnetic flux density at 10mm below coil

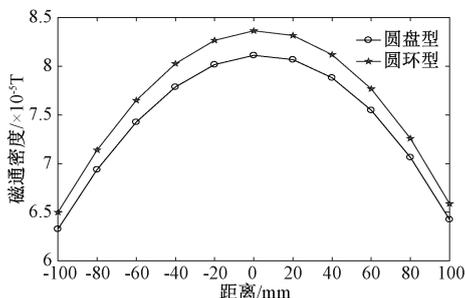


图 19 线圈外 150mm 处磁通密度比较

Fig. 19 Comparison of magnetic flux density at 150mm outside coil

图 20 为圆环型屏蔽层加外沿和不加边沿时 150mm 处磁通密度实验值比较。可以看出,加外沿后,最大磁通密度下降约为 10%。

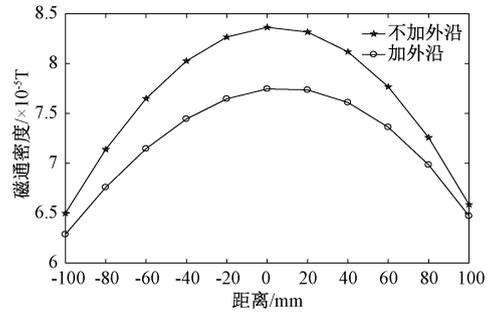


图 20 圆环型屏蔽层加外沿和不带边沿比较

Fig. 20 Comparison of ring-shaped shield with and without edge

将图 18、图 19、图 20 分别与图 4、图 5、图 7 进行对比可知,圆盘型屏蔽层的实验结果比仿真数值大 0.0003T,圆环型屏蔽层的实验结果比仿真数值大 0.0004T,圆环型带边沿屏蔽层的实验结果比仿真数值大  $0.2 \times 10^{-5}$  T。

## 7 结论

为了提高无线电能传输系统中接收电路和发射电路的可靠性以及保证系统周围生命体的安全,本文结合屏蔽层结构及尺寸的优化设计,首次对系统发射线圈下方 10mm 处的磁通密度、线圈外 150mm 处对周围环境的电磁污染程度进行了仿真和实验验证,仿真和实验结果基本吻合,结论如下:

(1)外形尺寸一定的情况下,圆环型和扇型屏蔽层所用材料和重量小于圆盘型和田字型屏蔽层,但是前两种屏蔽层的屏蔽效果与后两种屏蔽层的屏蔽效果相近。

(2)对于圆盘型屏蔽层,加外沿屏蔽效果明显,而加内沿影响较小;对于圆环型及扇型屏蔽层,加内沿后在发射线圈下方 10mm 处水平位置的屏蔽效果要优于外沿,加外沿在线圈外 150mm 处垂直位置的屏蔽效果要优于内沿。

(3)随着边沿延伸距离的增加,圆环型屏蔽层在发射线圈下方 10mm 处水平位置以及线圈外 150mm 处垂直位置的屏蔽效果越来越好。

(4)带边沿扇型屏蔽层相较于其他三种屏蔽层,其具有体积小、成本低、屏蔽效果好、易于生产、安装方便等特点,综合分析扇型屏蔽层的体积和屏蔽效果之后,可选择扇型屏蔽层的填充比为 6/9。

## 参考文献 (References):

[1] Moon S C, Moon G W. Wireless power transfer system

- with an asymmetric four-coil resonator for electric vehicle battery chargers [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31 (10): 6844-6854.
- [2] Huang C C, Lin C L, Wu Y K. Simultaneous wireless power/data transfer for electric vehicle charging [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 64 (1): 682-690.
- [3] Kilinc E G, Ghanad M A, Maloberti F, et al. A remotely powered implantable biomedical system with location detector [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 2015, 9 (1): 113-123.
- [4] 田子建, 林越, 陈健, 等 (Tian Zijian, Lin Yue, Chen Jian, et al.). 无线输电技术及其在矿井安全监控系统中的应用 (Wireless transmission technology and its application in mine safety monitoring system) [J]. *工矿自动化 (Automation of Industry and Mining)*, 2014, 40 (7): 32-36.
- [5] 陈文仙, 陈乾宏 (Chen Wenxian, Chen Qianhong). 共振式无线电能传输技术的研究进展与应用综述 (Research progress and application of resonant radio energy transmission technology) [J]. *电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy)*, 2016, 35 (9): 35-47.
- [6] 张献, 苑朝阳, 杨庆新, 等 (Zhang Xian, Yuan Zhaoyang, Yang Qingxin, et al.). 自激推挽式磁耦合无线电能传输系统磁屏蔽特性分析 (Analysis of magnetic shielding characteristics of self excited push-pull magnetic coupled radio transmission system) [J]. *中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE)*, 2018, 38 (2): 555-561.
- [7] 张献, 章鹏程, 杨庆新, 等 (Zhang Xian, Zhang Pengcheng, Yang Qingxin, et al.). 基于有限元方法的电动汽车无线充电耦合机构的磁屏蔽设计与分析 (Design and analysis of the magnetic shielding of the wireless charging coupling mechanism of electric vehicles based on the finite element method) [J]. *电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society)*, 2016, 31 (1): 71-79.
- [8] Zeng H, Liu Z, Hou Y, et al. Optimization of magnetic core structure for wireless charging coupler [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, 53 (6): 8000804.
- [9] 马中原, 廖承林, 王丽芳 (Ma Zhongyuan, Liao Chenglin, Wang Lifang). 金属异物对电动汽车无线充电系统影响分析 (Analysis of metal foreign object setting on electric vehicle wireless power transfer system) [J]. *电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy)*, 2017, 36 (2): 14-20.
- [10] 吴晓康, 杨庆新, 张献, 等 (Wu Xiaokang, Yang Qingxin, Zhang Xian, et al.). 电动汽车动态充电中耦合结构研究及其效率分析 (Coil structure study and efficiency analysis for the driving wireless charging system of electric car) [J]. *电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy)*, 2016, 35 (9): 8-13.
- [11] 石佳 (Shi Jia). 多功率等级 ICPT 系统的线圈优化设计 (Coil optimization design of multi power level ICPT system) [D]. 重庆: 重庆大学 (Chongqing: Chongqing University), 2014.
- [12] 刘志珍, 曾浩, 陈红星, 等 (Liu Zhizhen, Zeng Hao, Chen Hongxing, et al.). 电动汽车无线充电系统磁芯结构的设计及优化 (Design and optimization of magnetic core structure for wireless charging system of electric vehicle) [J]. *电机与控制学报 (Electric Machines and Control)*, 2018, 22 (1): 8-15.
- [13] Dai Z, Wang J, Long M, et al. Magnetic shielding structure optimization design for wireless power transmission coil [J]. *AIP Advances*, 2017, 7 (9): 095013.
- [14] Jiseong K, Jonghoon K, Sunkyu K, et al. Coil design and shielding methods for a magnetic resonant wireless power transfer system [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2013, 101 (6): 1332-1342.
- [15] Li Z, Zhu C, Jiang J, et al. A 3-kW wireless power transfer system for sightseeing car supercapacitor charge [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32 (5): 3301-3316.
- [16] 朱庆伟, 陈德清, 王丽芳, 等 (Zhu Qingwei, Chen Deqing, Wang Lifang, et al.). 电动汽车无线充电系统磁场仿真与屏蔽技术研究 (Research on magnetic field simulation and shielding technology of electric vehicle wireless charging system) [J]. *电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society)*, 2015, 30 (1): 143-147.
- [17] 王春芳, 齐飞, 陈杰民 (Wang Chunfang, Qi Fei, Chen Jiemin). 单管无线电能传输系统主电路参数的优化设计 (Optimal design on the compensation network of ICPT system with single switch) [J]. *电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy)*, 2015, 34 (5): 59-62, 69.
- [18] Terai H, Sumiyoshi S, Kitaizumi T, et al. Utility-interactive solar photovoltaic power conditioner with soft switching sinewave modulated inverter for residential applications [A]. *IEEE Power Electronics Specialists Conference [C]*. 2002. 3: 1501-1505.

## Research of shield structure for wireless power transfer system

LI Hou-ji<sup>1</sup>, WANG Chun-fang<sup>1</sup>, WEI Zhi-hao<sup>1</sup>, LI Dan<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China;

2. Qingdao Lu Yu Energy Technology Co., Ltd., Qingdao 266071, China)

**Abstract:** In the working process, the loosely coupled transformer in the wireless energy transmission system reduces the reliability of the receiving circuit and the transmitting circuit of the system due to the electromagnetic interference, and has certain influence on the surrounding biological safety. For this reason, based on the 1kW active clamp type radio energy transmission system, four shielded layer structures and sizes for loosely coupled transformers are designed. The finite element simulation software is used to compare and analyze the horizontal position at 10mm below the transmitting coil and 150mm outside the coil. From the disc type, the ring type and the fan type shields, the fan type shield with edge is selected as the one having best shielding effect under the premise of ensuring the reliability of the transmitting circuit and biological safety. Taking the circular shielding layer as an example, the influence of the extension distance of the inner and outer edges on the shielding effect is analyzed, and the optimal distance extending inward and outward is optimized. The fill ratio of the fan shield is optimized. Finally, a system experiment platform is built, and some shield layers are experimentally verified.

**Key words:** shield layer; loosely coupled transformer; wireless power transfer; magnetic flux density